

TINJAUAN KEKAKUAN PADA KOLOM RETROFIT DENGAN PENGEKANGAN CARBON WRAPPING

Oleh : Edy Purwanto¹⁾, Rudi Setiadji A²⁾

ABSTRAKSI / ABSTRACT

Metode pengekangan pada permukaan kolom merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan kemampuan dan kekakuan kolom tersebut. Kekakuan kolom diperlukan untuk membatasi defleksi lateral struktur. Retakan yang terjadi pada kolom yang rusak mengurangi nilai kekakuan sehingga diperlukan adanya *confinement* untuk memperlambat perluasan retak yang bisa menimbulkan kehancuran kolom pada beban yang lebih tinggi. Hasil pengujian pada benda uji kolom menunjukkan bahwa kekakuan KPR pada tahap *uncracked* lebih rendah, tetapi mempunyai nilai beban retak pertama lebih besar. Kekakuan KPR pada tahap *cracked* mengalami peningkatan hingga lebih dari tiga kali lipat nilai kekakuan KN, tetapi terdapat nilai beban leleh yang lebih rendah

Confinement method of column surface represent one of the effort to increase capacity and stiffness of column. Column's stiffness is used to restrict lateral deflection of structure. Crack at damaged column decrease it's stiffness so that it needs an existence of confinement to slow down crack extension which can generate ruination of structure at higher level load. Result of this experiment indicates that stiffness of uncracked phase is lower but it has bigger initial crack load value. Stiffness at cracked phase experiences a stiffness three times as value as stiffness of KN, but it has a lower yield load.

Keywords : confinement, crack, stiffness, increase.

¹⁾ Dosen Jur. Teknik Sipil FT UNS

²⁾ Alumni Jur. Teknik Sipil FT UNS

PENDAHULUAN

Kerusakan struktur bangunan dapat disebabkan oleh alam dan manusia. Faktor alam mempunyai kontribusi melalui perubahan cuaca, proses abrasi, kebakaran, dan gempa bumi. Faktor manusia memberikan pengaruh pada proses perhitungan beban rencana yang tidak tepat oleh perancang bangunan, berkurangnya kekuatan beton karena kelebihan penambahan air dalam *mix design*, dimensi elemen struktur yang berkurang akibat kesalahan pemasangan bekisting ataupun tulangan, dan pembebanan yang melebihi beban rencana oleh pengguna bangunan. Kerusakan bangunan akibat kelebihan beban biasanya terlihat jelas dan mudah

dideteksi. Tegangan berlebihan yang timbul pada kolom bangunan menghasilkan pola retak, kehancuran bagian kolom secara lokal, bahkan keruntuhan seluruh struktur (*total collapse*).

Bangunan yang mengalami kerusakan bisa dengan mudah diganti dengan bangunan baru, tetapi pada situasi bangunan yang rusak banyak jumlahnya dan biaya penggantianannya sangat tinggi tidak memberi pilihan selain perbaikan. Perbaikan kerusakan dapat mengembalikan kemampuan bangunan seperti semula, tetapi untuk menghindari terjadi kembali kerusakan dengan penyebab yang sama diperlukan peningkatan kemampuan struktur (*retrofit*). Kerusakan bangunan selain *total collapse* dapat diperbaiki dengan

berbagai teknik, misalnya pengisian retak dengan *epoxy injection grouting*, perbaikan bagian yang hancur dengan *polymer/epoxy mortars*, dan pemberian kurungan (*confinement*) bagian yang rusak untuk meningkatkan kekuatan dengan *steel encasing*, *concrete encasing*, atau *fiber wrap encasing*. Analisa tingkat kerusakan dilakukan dahulu untuk pemilihan metode perbaikan. Menurut Thermou dan Elnashai (Bai, 2003) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan teknik perbaikan, yaitu : perbandingan biaya terhadap keutamaan struktur, ketersediaan tenaga kerja, jangka waktu pekerjaan, fungsi dan estetika bangunan yang ada, kecukupan kekakuan, kekuatan, dan daktilitas, kapasitas pondasi yang masih mencukupi,

material dan teknologi yang tersedia. Perbaikan elemen struktur dengan perkuatan eksternal lapisan beton bertulang di sekeliling penampang menghasilkan pertambahan beban dan pertambahan dimensi yang cukup besar sehingga mengganggu arsitektural bangunan. Situasi tersebut menjadi pertimbangan untuk melakukan perbaikan dengan *fiber wrapping* sebagai bahan perkuatan yang relatif ringan, mudah dalam pemasangan, mempunyai kekuatan besar, tahan terhadap korosi, dan hanya sedikit menambah dimensi kolom.

Hampir semua kolom pada struktur beton mengalami gaya fleksural disamping gaya tekan. Hal ini disebabkan letak beban yang tidak berada di pusat penampang kolom, atau

disebabkan kolom menahan sebagian dari momen pada ujung balok yang ditopangnya. Selain defleksi vertikal balok, defleksi lateral rangka struktur harus menjadi pertimbangan dalam perencanaan struktur rangka beton. Defleksi lateral harus dibatasi untuk mencegah perasaan tidak nyaman bagi pengguna bangunan, kerusakan pada partisi, atau efek $P-\Delta$ yang berbanding terbalik dengan kekakuan lateral. Defleksi lateral rangka dipengaruhi oleh kekakuan semua elemen penyusun struktur termasuk kolom.

Berdasarkan jenis serat perkuatan yang ada, *carbon fiber* mempunyai kekuatan dan kekakuan yang terbesar. Penelitian sebelumnya menunjukkan peningkatan kekakuan kolom dengan *carbon fiber wrap* dibanding kolom

tanpa perkuatan. Retakan yang terjadi pada kolom yang rusak mengurangi nilai kekakuan dan diperlukan adanya *confinement* untuk memperlambat perluasan retak yang bisa menimbulkan kehancuran penampang beton pada tahap pembebanan yang tinggi, sehingga diperkirakan *carbon fiber wrapping* akan mampu menambah kekakuan kolom perbaikan.

LANDASAN TEORI

Peningkatan Kapasitas Struktur

Peningkatan kapasitas struktur (*retrofit*) pada umumnya dapat dilakukan dengan dua metode. Metode pertama adalah *structure-level retrofit* yang meliputi modifikasi menyeluruh terhadap sistem struktural. Modifikasi tersebut dapat berupa penambahan dinding struktural atau *steel braces*.

Penambahan dinding struktural atau perbaikan dinding geser yang sudah ada efektif mengontrol defleksi lateral bangunan dan mengurangi kerusakan elemen struktur. Biaya dan waktu dapat dikurangi dengan pemakaian *shotcrete* atau *precast panels*. Pemasangan *steel bracing* efektif meningkatkan kekuatan dan kekakuan keseluruhan bangunan. Pondasi mungkin mendapat tambahan beban pada lokasi *bracing* sehingga pondasi tersebut masih perlu dievaluasi kembali. Sambungan terhadap rangka beton dapat menjadi bagian yang berbahaya selama pembebanan terutama saat gempa. Metode *retrofit* kedua adalah *member-level retrofit* yang meliputi peningkatan daktilitas elemen struktur lokal hingga mencapai batas ijin. Peningkatan tersebut melalui

penambahan *concrete jacket* atau FRP *jacket* pada kolom yang berfungsi sebagai *confinement*. Perbaikan ini lebih efektif dari segi biaya karena hanya komponen tertentu saja yang ditingkatkan kemampuannya. Perkuatan kolom dengan FRP *jacket* bertujuan untuk meningkatkan kapasitas geser, daktilitas, dan kapasitas deformasi akibat lentur. Pemasangan yang mudah, rasio kekuatan terhadap berat yang besar, dan ketahanan terhadap korosi menjadi pilihan utama untuk perbaikan walaupun harga FRP cukup mahal.

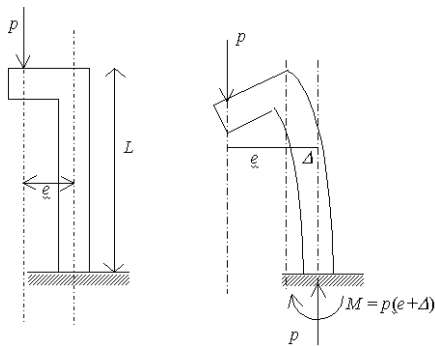
Kekakuan Kolom

Kolom yang diberi beban titik p secara eksentris, akan mengalami momen pada dasar kolom sebesar :

$$M = p.e \quad (1)$$

Kolom mengalami defleksi sebesar Δ saat beban titik p bekerja, untuk kesetimbangan gaya internal, momen pada dasar kolom menjadi :

$$M = p(e + \Delta) \quad (2)$$



Gambar 1. Pembebanan Eksentris Kolom

Kekakuan menunjukkan kemampuan untuk mengalami defleksi seminimal mungkin. Besarnya defleksi akan meningkatkan nilai momen kolom yang harus didesain, sehingga kekakuan

kolom diperlukan berhubungan dengan masalah kekuatan kolom.

Perencana struktur harus memperhatikan faktor kekakuan untuk pembatasan defleksi yang terjadi dan tidak hanya memperhitungkan kekuatan semua komponen struktur agar mampu menahan beban layan dalam kondisi elastis. Beton bertulang diperbolehkan mengalami retak, tidak terjadi leleh pada baja tulangan (dapat menyebabkan retakan lebih lebar), dan beton tidak hancur. Keruntuhan struktur daktail dianggap mulai terjadi setelah tulangan tarik leleh, sehingga pada pembebanan setelah leleh faktor daktilitas lebih berperan dibanding kekakuan karena berfungsi sebagai cadangan kapasitas defleksi pada kondisi beban yang berlebihan.

Defleksi kolom akibat beban titik statis eksentris pada Gambar 1 dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta = \frac{(p \cdot e)L^2}{2EI} \quad (3)$$

dimana : p =beban titik statis eksentris, e =eksentrisitas beban, L =tinggi kolom, E =modulus elastisitas material, I =momen inersia penampang kolom.

Nilai kekakuan berdasarkan rumus defleksi yang ada didapatkan dari persamaan berikut :

$$K = \frac{p}{\Delta} \quad (4)$$

$$K = \frac{2EI}{eL^2} \quad (5)$$

Kekakuan lentur pada awalnya tergantung pada ukuran geometri elemen dan modulus elastisitas materialnya. Hubungan tersebut tidak berlaku secara sederhana pada struktur

beton bertulang karena harus mempertimbangkan pengaruh retakan dan kontribusi beton terhadap tegangan tarik (Paulay, 1992). Hubungan antara beban dengan defleksi elemen beton bertulang dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear dari tahap sebelum retak, setelah retak, dan setelah tulangan tarik leleh (Nawy, 1990). Tahap pembebanan dengan hubungan linier dari awal hingga runtuh meliputi tahap berikut :

1. Tahap *uncracked*, pada daerah ini hubungan beban dan defleksi linier elastis hingga beban retak pertama (P_{crack}). Retak pertama terjadi saat tegangan tarik melebihi kekuatan tarik beton. Besarnya kekakuan tahap ini sebesar kemiringan kurva yang dihitung dengan rumus :

$$K = \frac{P_{crack}}{d_{crack}} \quad (6)$$

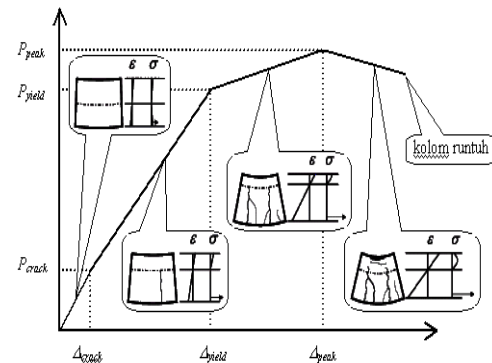
2. Tahap *cracked*, terjadi setelah P_{crack} dimana retakan mulai terbentuk dan kontribusi kekuatan tarik beton tidak ada. Akibat hal tersebut kekakuan berkurang hingga kondisi tulangan tarik leleh pada nilai beban leleh (P_{yield}). Selama tahap ini, baja tulangan mulai kehilangan kekuatan lekat dan retakan bertambah banyak. Nilai kekakuan tahap ini dihitung melalui persamaan :

$$K = \frac{P_{yield} - P_{crack}}{d_{yield} - d_{crack}} \quad (7)$$

3. Tahap *post yield*, terjadi setelah titik P_{yield} dimana tulangan tarik mulai mengalami regangan leleh pada nilai tegangan leleh tulangan yang tetap.

Kemiringan kurva mengalami penurunan lebih cepat sampai tegangan tekan beton mencapai maksimal pada beban puncak (P_{peak}).

4. Tahap *post peak*, dari titik P_{peak} regangan beton daerah tekan bertambah hingga akhirnya beton daerah tekan hancur dan terkelupas pada saat beban runtuh ($P_{failure}$) tercapai.



Gambar 2. Kurva Beban- defleksi ($P-\Delta$) Elemen Struktur Duktail

METODOLOGI PENELITIAN

Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini ada dua macam, yaitu berupa silinder dan kolom. Jenis silinder ada dua buah, yaitu silinder normal dan silinder terkekang, sedang kolom yang dipakai adalah kolom yang telah rusak karena pengujian sebelumnya, selanjutnya kolom tersebut diperbaiki dan diperkuat dengan memakai bahan carbon fiber berupa CFRP-Wrapping yang dipasang dalam arah transversal sebanyak satu lapis.

Tabel 1. Kode nama sampel

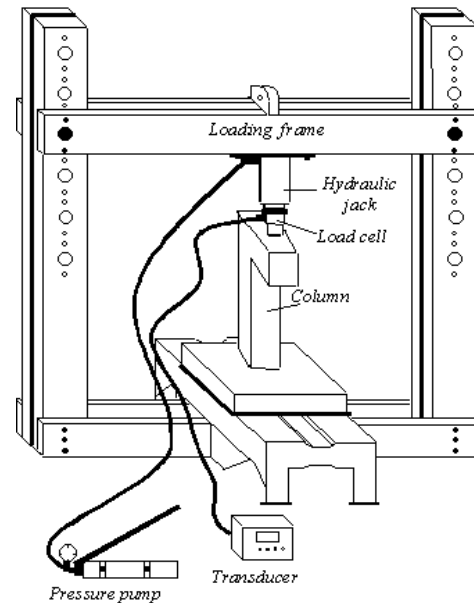
Silinder Beton		Kolom Beton Bertulang		Keterangan
Kode	Jmla	Kode	Jml	
SN-1	1	KN-1	1	S = silinder N = normal W = <i>wrapping</i> satu lapis CFRP KN = kolom normal KPR = perbaikan dan
SN-2	1	KN-2	1	
SN-3	1	KN-3	1	
SW-1	1	KPR-1	1	
SW-2	1	KPR-2	1	
SW-3	1	KPR-3	1	
SW-4	1			

Tahapan dan Prosedur Pengujian

Benda Uji Kolom

Semua benda uji yang telah diperbaiki dan diperkuat dengan bahan *carbon wrapping*, setelah berumur 28 hari kemudian di-*set-up* pada *loading frame* dan diberi beban secara eksentris dengan eksentrisitas sebesar 120 mm. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan interval kenaikan beban sebesar

150 kg. Pembebanan dilakukan sampai benda uji mengalami keruntuhan yang direncanakan dengan indikasi beban telah melewati beban maksimum kemudian turun sebesar 20 % dari beban maksimum tersebut. Selama pembebanan dilakukan pengamatan besarnya lendutan yang terjadi diujung atas benda uji kolom yang sebelumnya telah dipasang *dial gauge*, juga dilakukan pengamatan terhadap munculnya retak pada permukaan benda uji dan diukur lebar retaknya. Dari data beban dan lendutan yang ada selanjutnya dibuat grafik hubungan antara besarnya beban dan lendutan untuk mengetahui kondisi beban dan lendutan pada saat leleh, maksimum dan saat runtuh.

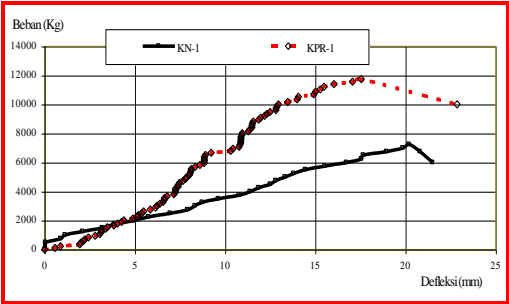


Gambar 2. Set-up alat dan benda uji

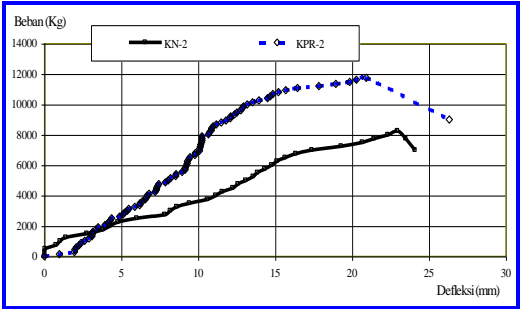
Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dari data beban dan lendutan yang didapat pada pengujian benda uji kolom selanjutnya dibuatkan grafik hubungan beban lendutan seperti gambar 3-5. Selanjutnya dari gambar tersebut diambil data-data beban dan lendutan

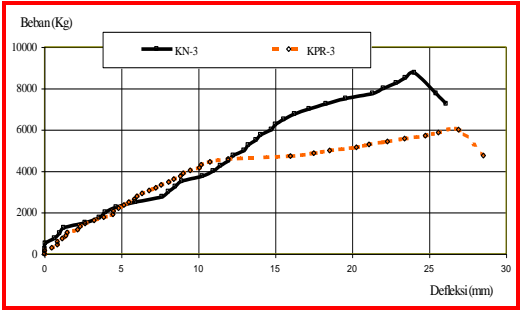
pada kondisi yang diinginkan seperti yang terangkum pada Tabel 2. Sedangkan nilai kekakuannya dihitung dan ditabelkan pada Tabel 3.



Gambar 3. Grafik hubungan beban-lendutan KN-1 dan KPR-1



Gambar 4. Grafik hubungan beban-lendutan KN-2 dan KPR-5



Gambar 5. Grafik hubungan beban-lendutan KN-3 dan KPR-3

Tabel 2. Beban dan Defleksi Kolom Normal

Kode Sampel	Retak Pertama		Tulangan Tarik Leleh		Kapasitas Puncak		Kolom Runtuh	
	P_{crack} (kg)	d_{crack} (mm)	P_{yield} (kg)	d_{yield} (mm)	P_{peak} (kg)	d_{peak} (mm)	$P_{failure}$ (kg)	$d_{failure}$ (mm)
KN-1	750	0,88	6750	18,95	7250	20,20	6000	21,50
KN-2	1250	1,39	7250	19,30	8250	22,96	7000	24,10
KN-3	1250	1,25	7750	21,33	8750	24,05	7250	26,10
rata-	1083,33	1,17	7250	19,86	8083,33	22,40	6750	23,90
KPR-1	2380,95	5,19	6666,67	9,22	11750	17,54	10000	22,86
KPR-2	1176,47	2,38	11076,92	16,46	11750	20,93	10000	26,32
KPR-3	588,24	2,07	4444,44	10,75	6000	26,91	4750	28,52
rata-rata	1381,89	3,21	7396,01	12,14	9833,33	21,79	8250	25,90

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kekakuan Kolom

Kode Sampel	Tahap <i>uncracked</i>			Tahap <i>cracked</i>		
	P_{crack} (kg)	d_{crack} (mm)	K (kg/mm)	P_{yield} (kg)	d_{yield} (mm)	K (kg/mm)
KN-1	750,00	0,88	852,27	6750,00	18,95	332,04
KN-2	1250,00	1,39	899,28	7250,00	19,30	335,01
KN-3	1250,00	1,25	1000,00	7750,00	21,33	323,71
KPR-1	2380,95	5,19	458,76	6666,67	9,22	1063,45
KPR-2	1176,47	2,38	494,32	11076,92	16,46	1431,54
KPR-3	588,24	2,07	284,17	4444,44	10,75	444,26

Tabel 4. Perbandingan Nilai Rata-rata Kekakuan

Kode Sampel	Tahap <i>uncracked</i>			Tahap <i>cracked</i>		
	P_{crack}	d_{crack}	K	P_{yield}	d_{yield}	K
	(kg)	(mm)	(kg/mm)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
KN	1083,33	1,17	917,18	7250,00	19,86	330,25
KPR	1381,89	3,21	412,42	7396,01	12,14	979,75
Rasio	1,28	2,74	0,45	1,02	0,61	2,97

Dari hasil analisis yang dilakukan maka bisa diketahui bahwa kekakuan tahap *uncracked* semua sampel KPR mengalami penurunan dan hanya bernilai rata-rata 45% dari kekakuan kolom normal. Akibat penurunan tersebut defleksi saat retak pertama KPR lebih besar 274% dibanding defleksi saat retak pertama sampel KN, lebar retak awal KPR juga bertambah 22%. Sebagian penampang sepanjang kolom yang sudah banyak mengalami retak akibat pengujian pada kondisi kolom normal (terlihat jelas dalam pola

retak sampel KN) menyebabkan nilai momen inersia penampang kecil, sehingga kekakuan berkurang dan setiap penambahan beban diikuti dengan pertambahan defleksi yang besar. Beban retak awal KPR meningkat walaupun kekakuan turun. Beban retak awal KPR naik menjadi 128% dibanding beban retak awal KN. Pertambahan defleksi yang besar mempercepat pertambahan regangan aksial dan lateral untuk memicu peran CFRP *wrapping*. Pengaruh CFRP *confinement* adalah memperluas daerah tekan dengan

menurunkan letak garis netral, mencapai sebagian daerah yang sudah retak sehingga mampu meningkatkan nilai beban retak awal. Perluasan daerah tekan terlihat dari pola retak yang terjadi, dimana penambahan retakan terjadi secara bertahap dan tidak secara langsung membentuk retakan sepanjang retakan lama. Sampel KPR mengalami kenaikan kekakuan mencapai 297% terhadap kekakuan KN pada tahap *cracked*. Modulus elastisitas CFRP yang besar menambah tahanan terhadap tekanan lateral beton di daerah tekan, menghambat perluasan retakan yang terjadi setelah tegangan tarik kolom melebihi kekuatan tarik beton sehingga kekakuan meningkat. Pencegahan perluasan retakan terlihat dari pola retak, dimana kedalaman jalur retak

KPR lebih kecil dibanding retak pada KN dan terdapat beberapa retakan KN yang tidak terlihat kembali pada pola retak KPR. Kenaikan kekakuan tersebut mengurangi defleksi KPR saat leleh, defleksi saat leleh KPR berkurang menjadi 61%. Beban leleh KPR menjadi 102% setara dengan beban leleh KN. Kondisi tersebut kemungkinan karena sudah terjadi regangan besar akibat defleksi yang besar saat tahap *uncracked*, sehingga regangan leleh tercapai lebih awal dan beban leleh yang terjadi tidak mampu melebihi beban leleh sampel KN.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisisi kekakuan dalam penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan :

1. Perbaikan dengan *retrofit* kolom memakai CFRP *wrapping* tidak meningkatkan kekakuan kolom pada tahap pembebanan *uncracked*, sebaliknya kekakuannya turun menjadi 45%. Penurunan kekakuan tersebut disebabkan banyaknya retakan terdahulu akibat pengujian kolom normal.
2. Penurunan kekakuan kolom perbaikan dengan *retrofit* tahap *uncracked* menyebabkan defleksi saat retak pertama lebih besar 274% daripada kolom normal, tetapi nilai beban retak pertama mampu meningkat menjadi 128%, akibat regangan yang besar memicu peran CFRP *wrapping* untuk meningkatkan kekuatan tekan beton.
3. Kekakuan kolom perbaikan dengan *retrofit* tahap pembebanan *cracked* naik menjadi 297%. Kenaikan nilai tersebut disebabkan pengaruh modulus elastisitas CFRP *wrapping* yang besar, sehingga menghambat perluasan retak.
4. Peningkatan kekakuan kolom perbaikan dengan *retrofit* tahap *cracked* berhasil mengurangi defleksi saat tulangan tarik leleh menjadi 61% dibanding kolom normal. Beban saat tulangan tarik leleh menjadi 102% walaupun defleksi saat leleh berkurang, regangan yang sudah besar setelah melewati tahap *uncracked*

menyebabkan regangan leleh tercapai lebih awal.

Daftar Pustaka

- Applied Technology Council, 1998, *Repair of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings*, FEMA 308 Report, Federal Emergency Management Agency, Redwood City.
- Bai, J. W., 2003, *Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Building Structures*, Consequence-Based Engineering (CBE) Institute Final Report, Mid-America Earthquake Center, Texas.
- De Lorenzis, L., 2001, *A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composites*, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Harries, K. A., & Carey, S. A., 2002, *Shape and Gap Effect on the Behavior of Variably Confined Concrete*, Cement and Concrete Research, Elsevier Science Ltd.
- Lam, L., & Teng, J., G.,, 2003, *Design-oriented Stress-strain Model for FRP confined Concrete in Rectangular Columns*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Sage Publication.